



УДК 621.396.96:621.391.26

А. Б. Бляхман, С. Н. Матюгин, А. Г. Прохоров

## О возможности применения обзорной радиолокационной станции для решения задач определения точек прицеливания (падения)

Рассмотрена возможность использования обзорных радиолокационных станций (РЛС) для распознавания баллистических целей (снарядов) и определения точек прицеливания (падения). Представлены результаты анализа натуральных данных, полученных во время стрельбовых испытаний, а также способ, позволяющий распознавать баллистические цели (снаряды) с помощью РЛС обзорного типа. Разработаны математическая модель, алгоритм распознавания баллистических целей, алгоритмы и программное обеспечение для определения точек прицеливания (падения).

**Ключевые слова:** обзорные РЛС, баллистические цели, траекторная обработка, распознавание снарядов, точка прицеливания.

### Введение

В современных локальных конфликтах, для которых характерна мобильная тактика ведения боя, широко применяется массированный артиллерийский огонь. Подавить огневые позиции противника за максимально короткое время можно при условии их оперативного вскрытия и оперативной корректировки собственного артиллерийского и минометного огня. В условиях недостаточной видимости или при невозможности организовать удобные пункты наблюдения для корректировщиков роль технических средств разведки, позволяющих решать указанные задачи, многократно возрастает.

На вооружении Российской армии имеются специализированные радиолокационные комплексы, позволяющие определять местоположение огневых позиций полевой артиллерии («Зоопарк», «Аистенок»), но в связи с актуальностью задачи требуется рассмотреть возможность использования для этой цели обзорных радиолокационных станций (РЛС).

В работе проанализирована возможность применения для решения этой задачи обзорной РЛС, работающей в длинноволновой части дециметрового диапазона. Было учтено влияние диапазона длин волн зондирующих сигналов, интервал времени обзора и другие факторы. Построена модель, позволяющая решать задачи распознавания снарядов и нахождения координат точек их прицеливания (падения).

### Постановка задачи и метод

По наблюдаемым точкам требуется найти параметры траектории снарядов в трехмерном пространстве и определить точки их падения.

При решении задач, связанных со стрельбой, для этого применяют уравнения внешней баллистики. Для расчета траектории снаряда необходимо численное интегрирование системы дифференциальных уравнений внешней баллистики с помощью достаточно трудоемкого метода конечных разностей [1].

Задачу предложено решать в два этапа, таким образом понизив размерность уравнений: сначала определить ориентацию плоскости стрельбы относительно горизонтальной плоскости, а затем в найденной вертикальной плоскости определить параметры закона изменения высоты снаряда. На рис. 1 траектория полета снаряда представлена в двух плоскостях. На горизонтальной плоскости  $XOY$  (плоскость горизонта оружия) в системе координат, привязанной к РЛС, показана проекция полета, в вертикальной плоскости  $Y'O'H'$  (плоскость стрельбы) – траектория полета. Таким образом, трехмерная задача разбивается на две двухмерные подзадачи.

В настоящее время получен ряд эмпирических уравнений, описывающих траекторию снаряда в воздухе, по виду сходных с известным уравнением траектории в безвоздушном пространстве [2]:

$$h = x \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2 \theta_0} (1 + KV_0^2 x), \quad (1)$$

где  $h$  – высота;

$x$  – расстояние от точки пуска на горизонтальной проекции трассы;

$\theta_0$  – угол стрельбы;

$g$  – ускорение свободного падения;

$V_0$  – начальная скорость снаряда;

$K$  – эмпирический коэффициент учета сопротивления воздуха.

© Бляхман А. Б., Матюгин С. Н., Прохоров А. Г., 2016

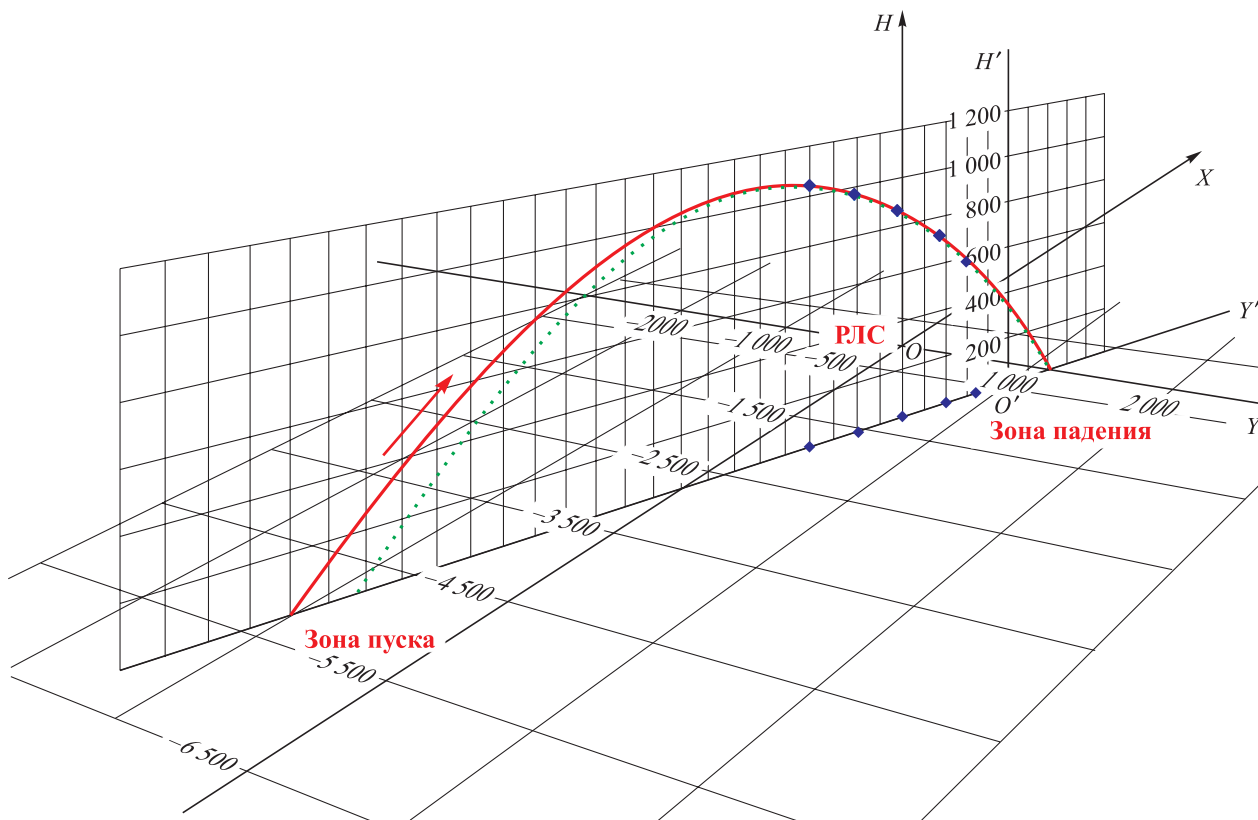


Рис. 1. Схема двухэтапного решения задачи

Добавляемый в уравнение траектории снаряда в воздухе множитель определяет большее, чем в пустоте, понижение снаряда относительно линии бросания, следовательно, при прочих равных условиях траектория имеет большую крутизну и меньшую дальность, чем при стрельбе в пустоте. Значение коэффициента  $K$  определяют опытной стрельбой, по результатам которой определяют полную горизонтальную дальность [2].

Характерными признаками баллистической цели (БЦ) являются прямолинейность траектории в горизонтальной плоскости (обычно полагают, что деривация очень мала по сравнению с дальностью стрельбы) и хорошая аппроксимация траектории баллистической кривой в вертикальной плоскости. О прямолинейности траектории можно судить по степени аппроксимации ее линейной функции, т. е. по малому значению функции невязки экспериментальных точек с построенной по ним трендовой прямой. Существенное отклонение от этого условия свидетельствует о том, что цель движется не по баллистической траектории и, скорее всего, оснащена механизмами для изменения курса. Это первый признак классификации БЦ.

Второй признак – хорошая аппроксимация баллистической кривой, также определяемая малой невязкой экспериментальных точек, но в вертикальной плоскости. Эти признаки позволяют сделать вывод о принадлежности цели к классу баллистических.

В предложенной модели полагается, что снаряд летит без отклонений в горизонтальной плоскости. Для аппроксимации методом наименьших квадратов использованы линейные, квадратичные (без учета сопротивления воздуха) и кубические функции (построение баллистической кривой с учетом сопротивления воздуха) [3].

В качестве функции невязки при линейной аппроксимации взят корень из суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от точной линейной зависимости, нормированный на число точек:

$$R_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - (A + Bx_i))^2}{N}}, \quad (2)$$

где  $[x_i, y_i]_{i=1..N}$  – набор из  $N$  пар координат экспериментальных точек;



$A, B$  – коэффициенты аппроксимирующей прямой в горизонтальной плоскости  $y = A + Bx$  [3].

В качестве функции невязки при квадратичной аппроксимации взят корень суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от точной квадратичной зависимости, нормированный на число точек:

$$R_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - (ay_i'^2 + by_i' + c))^2}}{N}, \quad (3)$$

где  $[h_i, y_i']_{i=1...N}$  – набор из  $N$  пар координат экспериментальных точек в вертикальной плоскости стрельбы;

$a, b, c$  – параметры аппроксимирующей параболы в вертикальной плоскости  $h = ay'^2 + by' + c$  [3].

Аналогично в качестве функции невязки при кубической аппроксимации траектории взят корень суммы квадратов отклонений экспериментальных точек трассы от точной квадратичной зависимости, нормированный на число точек:

$$R_3 = \left[ \sum_{i=1}^N \left( h_i - \left( y_i' \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{gy_i'^2}{2V_0^2 \cos^2 \theta_0} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times (1 + KV_0^2 y_i') \right) \right)^2 \right]^{1/2} / N, \quad (4)$$

где  $[h_i, y_i']_{i=1...N}$  – набор из  $N$  пар координат экспериментальных точек в вертикальной плоскости стрельбы;

$\theta_0, V_0, K$  – коэффициенты баллистической кривой (1).

Как и следовало ожидать, аппроксимация с учетом сопротивления воздуха позволяет получить лучший результат, чем аппроксимация простой параболой. Однако баллистическую траекторию строят численно, а параболическую – аналитически, что позволяет сразу получить решение, подставив в формулу координаты наблюдаемых точек. Для численного решения требуется больше времени.

Наблюдаемое положение снаряда на траектории влияет на точность определения точек пуска и падения. Модельным расчетом показано, что параболическая аппроксимация по точкам на всей траектории позволяет определить

точку пуска и падения с точностью до одного порядка. В случае ограничения по техническим причинам участка слежения аппроксимация по точкам, расположенным на восходящей ветви траектории, позволяет лучше определить точку пуска. Аппроксимация по точкам вблизи вершины траектории дает возможность определить точки пуска и падения с близкой точностью, но хуже, чем при наличии точек на всей траектории. Аппроксимация по точкам на нисходящей ветви траектории оптимальна при определении точки прицеливания, так как при этом уменьшается участок экстраполируемой траектории. В ходе натурального эксперимента чаще реализовывался последний вариант.

### Анализ натуральных данных

На рис. 2, 3 представлены результаты параболической и баллистической аппроксимации натурной траектории в горизонтальной (значение функции невязки, рассчитанное по формуле (2),  $R_1 = 2,9$  м) и вертикальной (значения функции невязки  $R_2 = 3,3$  м и  $R_3 = 2,8$  м, найденные по формулам (3) и (4) соответственно) плоскостях. Подрыв снаряда происходил в воздухе.

Баллистическая аппроксимация точнее приближает траекторию снаряда к истинной, но, как отмечалось, для ее расчета требуется существенно больше времени. При определении точки падения была учтена высота подрыва снаряда. В точке падения разность в результатах предложенных аппроксимаций с учетом сопротивления воздуха (баллистика) и без него (парабола) по оси  $Y'$  составила около 20 м, что в соответствии с проведенным расчетом подтверждает целесообразность учета в вычислениях сопротивления воздуха.

Из таблицы, где приведены сводные результаты расчета по всем дням стрельбовых испытаний, ясно, что в случае, когда дальность цели более 4000 м и цель движется под средними ракурсными углами менее  $20^\circ$ , амплитуда отраженного сигнала падает, увеличиваются ошибки при определении азимута, приводящие к тому, что среднее значение функции невязки  $R_1$ , найденное по формуле (2), возрастает. В случае когда цель находится далеко и (или) низко, т. е. наблюдается под малыми углами места, возрастают ошибки при определении высоты, что приводит к возрастанию

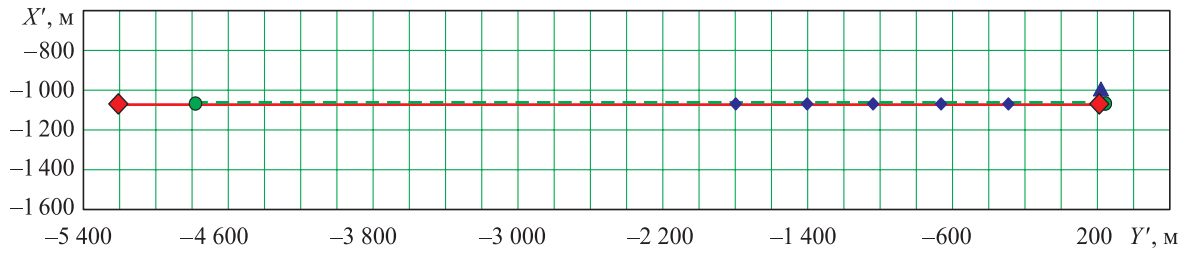


Рис. 2. Точки траектории БЦ в горизонтальной плоскости и два вида аппроксимации:

♦ – точки трассы; ▲ – контрольная точка подрыва снаряда; ● и ◆ – параболические и баллистические расчетные точки пуска и падения

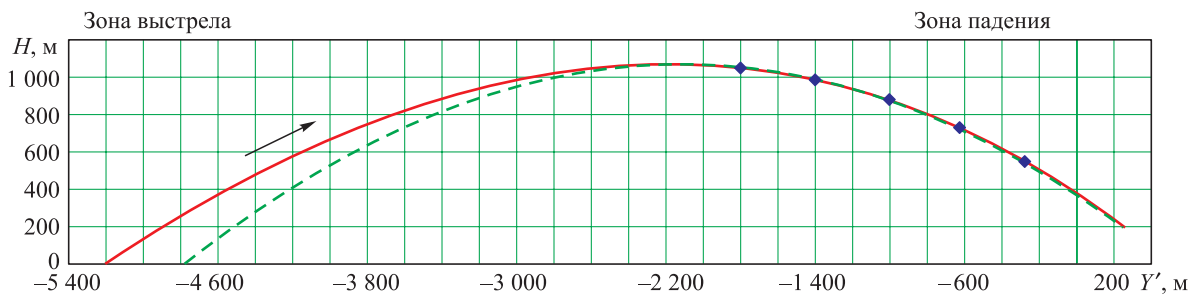


Рис. 3. Точки траектории БЦ в вертикальной плоскости и два вида аппроксимации:

..... – параболическая аппроксимация (без учета сопротивления воздуха); — – баллистическая аппроксимация (с учетом сопротивления воздуха); ♦ – точки трассы, полученные от РЛС

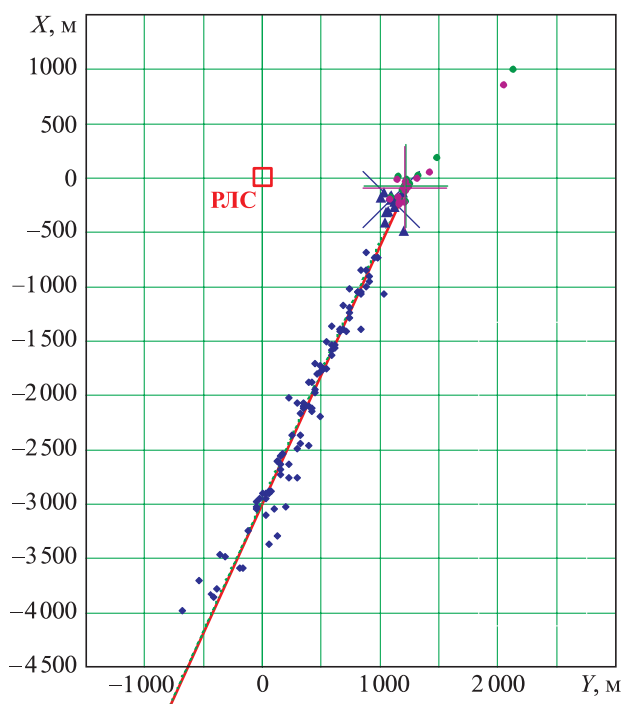
Сводные результаты расчета

Параметры	День стрельбовых испытаний					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й
Тип боеприпаса	122-мм		152-мм		РСЗО «Град»	
Общее число трасс	15	21	9	24	14	27
Число трасс с траекториями, определяемыми как баллистические	12	18	6	8	1	0
Вероятность распознавания БЦ, %	80,0	85,7	66,7	33,3	7,1	0
Диапазон дальности уверенного наблюдения $D$ , м	1221...2832	1245...4443	4150...9790	4102...10376	7519...14624	8325...15723
Диапазон углов места по точкам уверенного сопровождения, град	4,3...21,1	19,6...51,3	1,7...22,2	0...21,8	-1,8...14,8	-0,8...16,6
Средний угол места по точкам уверенного сопровождения, град	17,0	30,6	15,5	14,8	5,4	7,2
Средний ракурсный угол по точкам уверенного сопровождения, град	53,8	39,0	16,0	15,3	6,5	9,8
Средняя амплитуда, отн. ед.	5493,8	1413,0	169,5	130,1	125,9	143,8
Среднее за день значение функции невязки линейной аппроксимации $R_{1cp}$ , м	7,9	34,7	118,8	121,5	107,3	100,0
Среднее за день значение функции невязки квадратичной аппроксимации $R_{2cp}$ , м	5,2	17,0	69,2	157,9	239,2	275,1



среднего значения функции невязки  $R_2$ , найденного по формуле (3). При значениях  $R_1(2)$ ,  $R_2(3)$ , не превышающих соответствующие пороговые значения, и опущенных вниз ветвях параболы (отрицательное значение коэффициента при старшей степени параболы), траектория классифицировалась как баллистическая.

На рис. 4 представлены результаты расчетов и данные контроля подрывов снарядов. Основная часть точек трасс располагается вблизи точек падения и на минимальной дальности



**Рис. 4.** Расчетные и натурные точки падения в системе координат РЛС (второй день стрельбовых испытаний):

- ♦ – точки уверенного сопровождения с радара; ▲ – контрольные точки падения; × – медиана координат контрольных точек падения; ● – точки падения (парабола); ● – точки падения (баллистика); ..... – медиана расчетных точек падения (парабола); — — медиана расчетных точек падения (баллистика)

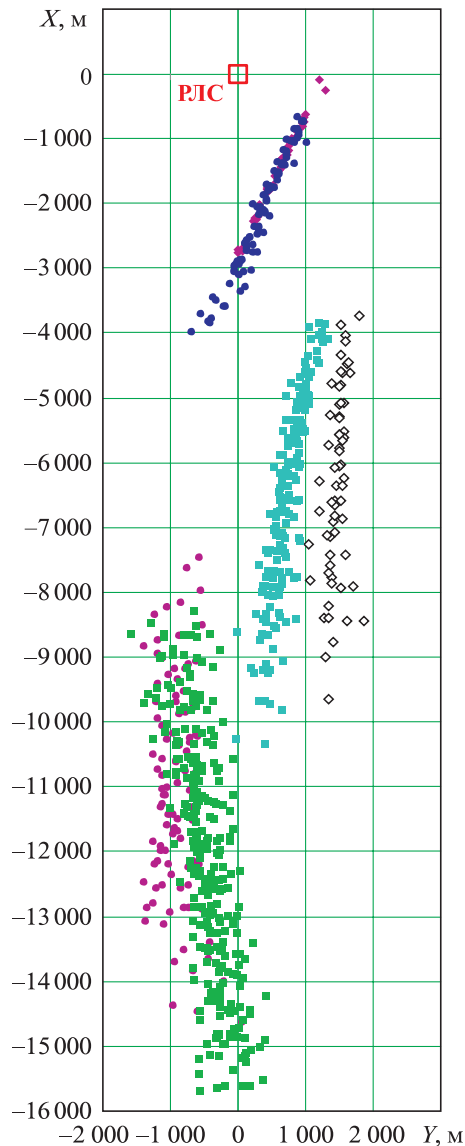
от РЛС. Видно, что разброс точек трассы уменьшается по мере приближения к точкам падения. Это связано с повышением точности измерения параметров при уменьшении дальности и увеличении примерно на 15...20 дБ отношения сигнал/шум отраженных от снарядов сигналов вследствие приближения значений ракурсных углов к  $90^\circ$ .

Ниже приведены результаты расчетов по трассам для второго дня стрельбовых испытаний:

Тип боеприпаса	122-мм	
Общее число трасс	18	
Число трасс с траекториями, определяемыми как баллистические	13	
Распознавание БЦ, %	72,2	
Метод аппроксимации	Парабола	Баллистика
Расстояние между медианами расчетных и контрольных точек падения, м	179,7	161,6
СКО точек падения, м:		
СКО <sub>⊥пад</sub> (перпендикулярно трассе)	125,2	120,5
СКО <sub>  пад</sub> (параллельно трассе)	384,5	343,0

Расчет выполняли с использованием двух моделей – параболической (без учета сопротивления воздуха) и баллистической (с учетом сопротивления воздуха). Две трассы не имели достаточного для построения траектории числа точек, для двух других трасс было получено завышенное значение функции невязки линейной аппроксимации, еще у одной трассы ветви траектории в вертикальной плоскости были направлены вверх. Для каждой из оставшихся 13 трасс построено по две траектории полета – параболическая (без учета сопротивления воздуха) и баллистическая (с учетом сопротивления воздуха).

По результатам второго дня испытаний и карте контроля подрывов определено, что отклонение между медианами расчетных и контрольных траекторий полета составило 161,6 м (по баллистической аппроксимации). Среднее квадратичное отклонение всех точек падения в двух проекциях: СКО<sub>⊥пад</sub> = 120,5 м и СКО<sub>||пад</sub> = 343,0 м. Эти значения характеризуют параметры эллипса рассеяния, для которого отношение проекций зависит от углов падения снарядов. На рис. 5 представлены точки траекторий, полученных с РЛС за шесть дней стрельбовых испытаний, в системе координат РЛС. На рисунке видно, что с уменьшением дальности и увеличением ракурсного угла уменьшается разброс точек трассы, что связано с увеличением точности определения координат цели. Очевидно, что следствием этого будет улучшение точности определения координат точек падения. Увеличение эффективной площади рассеяния при ракурсных углах цели  $70...90^\circ$ ,



**Рис. 5.** Точки всех траекторий на горизонтальной плоскости, полученных за шесть дней стрельбовых испытаний:

- ◆ – 1-й день (122-мм); ● – 2-й день (122-мм);
- ◆ – 3-й день (152-мм); ■ – 4-й день (152-мм);
- – 5-й день (РСЗО «Град»);
- – 6-й день (РСЗО «Град»)

исследованное в ряде работ [4–6], наблюдалось практически во всех экспериментах. Для получения достаточных точностных характеристик при определении точек падения необходимо учитывать эту особенность и размещать РЛС (или антенные модули) таким образом, чтобы обеспечить достижение наилучшей точности.

#### Выводы

1. Полученные результаты подтверждают возможность использования обзорных РЛС для решения задачи распознавания БЦ (снарядов) и определения точек их падения. Описанный

способ позволяет распознавать БЦ лишь на основе данных о траекториях, полученных с обзорных РЛС, и определять точки падения. При этом вероятность правильного распознавания БЦ будет зависеть от точности определения прямоугольных координат цели. В отличие от существующих специализированных РЛС [7], реализующих слежение и сопровождение цели и требующих большого объема исходных данных, в РЛС обзорного типа при использовании описанного способа удастся добиться необходимых результатов при малом объеме исходных данных.

2. При баллистической аппроксимации отклонение между медианами расчетных и контрольных точек падения снарядов составило 161,6 м, при этом  $СКО_{\perp пад} = 120,5$  м,  $СКО_{\parallel пад} = 343,0$  м (эти значения характеризуют параметры эллипса рассеяния).

3. Способ построения траекторий БЦ, классификации и нахождения точек падения, продемонстрированный на примере данных, полученных с РЛС обзорного типа, работающей в длинноволновой части метрового диапазона, пригоден и для других типов обзорных РЛС, позволяющих получать необходимые данные о траекториях.

4. На основе проведенного анализа можно предположить, что применение нескольких оптимально расположенных РЛС (или разнесенных вдоль линии боевого соприкосновения антенных и приемных модулей) должно обеспечить достаточную точность при определении траекторий БЦ (снарядов) и точек их прицеливания (падения). Подобный анализ применим также при определении точек пуска (выстрела).

#### Список литературы

1. Внешняя баллистика / А. Д. Чернозубов и др. М.: ВАИА им. Ф. Э. Дзержинского, 1954. Т. 1 – 463 с.; Т. 2 – 496 с.
2. Огневая подготовка. Ч. 1: Основы и правила стрельбы. Управление огнем / под общ. ред. Ю. И. Семенова. М.: Воениздат, 1978. 337 с.
3. Бахвалов Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Наука. 1975. 632 с.
4. Антифеев В. Н., Борзов А. Б., Быстров Р. П., Исаев И. Ш., Соколов А. В. Математические



модели рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы // Электромагнитные волны и электронные системы. 1998. № 10. С. 39–54.

5. Борзов А. Б. Анализ радиолокационных характеристик объектов сложной формы методом математического моделирования // Боеприпасы. 1994. № 3, 4. С. 32–38.

6. Шмагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.

7. Оружие России. Каталог. Т. I: Вооружение Сухопутных войск, 1996–1997. М.: АО «Милитэри Пэрэйд», 1995. 246 с.

Поступила 01.03.16

**Бляхман Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород.

Область научных интересов: радиолокация.

**Матюгин Сергей Никандрович** – кандидат физико-математических наук, начальник сектора АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород.

Область научных интересов: распространение радиосигналов, цифровая обработка радиолокационных сигналов и оптических изображений, распознавание образов.

**Прохоров Антон Геннадьевич** – инженер первой категории АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород.

Область научных интересов: разработка и исследование алгоритмов, цифровая обработка изображений, распознавание образов, нейросети.

## On the possibility of employing a surveillance radar station to solve the problems of locating points of aim (points of impact)

We consider the possibility of employing a surveillance radar station to recognise ballistic targets (projectiles) and locate points of aim. We present the results of full-scale live-fire trial data analysis and a method for implementing ballistic target (projectile) recognition by radar stations of the surveillance type. We developed a mathematical model, an algorithm for ballistic target recognition, as well as algorithms and software to locate the point of aim

**Keywords:** surveillance radar stations, ballistic targets, tracking, projectile recognition, point of aim.

**Blyakhman Aleksandr Borisovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy General Director in Research Work, Federal Research and Production Centre Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Nizhny Novgorod.

Science research interests: radiolocation

**Matyugin Sergey Nikandrovich** – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of Sector, Federal Research and Production Centre Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Nizhny Novgorod.

Science research interests: radio signal propagation, digital processing of radiolocation signals and optical images, image recognition

**Prokhorov Anton Gennadevich** – Engineer of the 1st rank, Federal Research and Production Centre Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Joint Stock Company, Nizhny Novgorod.

Science research interests: algorithm research and investigation, digital image processing, image recognition, neural networks.